中国生态农业学报 2017 年 2 月 第 25 卷 第 2 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Feb. 2017, 25(2): 188−199

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160748

代文才, 高明, 兰木羚, 黄容, 王金柱, 王子芳, 韩晓飞. 不同作物秸秆在旱地和水田中的腐解特性及养分释放规律[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 188−199

Dai W C, Gao M, Lan M L, Huang R, WANG J Z, Wang Z F, Han X F. Nutrient release patterns and decomposition characteristics of different crop straws in drylands and paddy fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 188−199

不同作物秸秆在旱地和水田中的腐解特性及养分释放规律*

代文才[1], 高　明[1**], 兰木羚[2], 黄　容[1], 王金柱[1], 王子芳[1], 韩晓飞[3]

(1. 西南大学资源环境学院/重庆市三峡库区农业面源污染控制研究中心　重庆　400715; 2. 广安市环境保护局　广安 638500; 3. 重庆市农业技术推广总站　重庆　401121)

摘　要: 以水稻、小麦、玉米秸秆和油菜、蚕豆青秆为研究对象, 采用尼龙网袋法, 研究了不同秸秆翻埋入旱地和水田后的腐解特性及养分释放规律, 以期为紫色丘陵区农业秸秆循环利用和秸秆还田技术提供理论依据。结果表明: 秸秆翻埋还田后, 5 种供试秸秆腐解速率均表现为前期(0~60 d)快、后期(60~360 d)慢。经过 360 d 的腐解, 旱地秸秆累积腐解率为 52.88%~75.80%, 表现为油菜>水稻>玉米>小麦>蚕豆趋势, 且蚕豆青秆累积腐解率显著低于其余秸秆; 水田中秸秆累积腐解率为 45.01%~62.12%, 表现为水稻>玉米>小麦>油菜>蚕豆趋势。5 种秸秆在旱地和水田中养分释放率均表现为钾>磷>氮>碳, 在试验终点, 旱地中秸秆碳、氮、磷和钾释放率分别为 65.50%~87.37%、54.64%~69.72%、89.65%~98.96%和 79.92%~96.63%, 且油菜秸秆养分释放率高于其他 4 种秸秆; 水田中秸秆碳、氮、磷、钾释放率变幅分别为 49.95%~69.57%、32.89%~77.11%、90.70%~96.80%、77.45%~90.47%。总体表现为秸秆在旱地土壤中的累积腐解率和养分释放率均大于水田, 旱地油菜和水稻秸秆较易腐解, 水田水稻和玉米秸秆较易腐解释; 秸秆中钾素释放速率较高。

关键词: 作物秸秆; 腐解特征; 养分释放; 旱地; 水田
中图分类号: S141.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1671-3990(2017)02-0188-12

Nutrient release patterns and decomposition characteristics of different crop straws in drylands and paddy fields*

DAI Wencai[1], GAO Ming[1**], LAN Muling[2], HUANG Rong[1], WANG Jinzhu[1], WANG Zifang[1], HAN Xiaofei[3]

(1. College of Resources and Environment, Southwest University / Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 400715, China; 2. Guang'an Environmental Protection Agency, Guang'an 638500, China; 3. Chongqing Agricultural Technology Extension Station, Chongqing 401121, China)

Abstract: To provide theoretical basis for crop straws recycling and straw use in agricultural fields, the characteristics of decomposition and release of nutrients of different crop straws [rice, wheat, corn, rapeseed (green stalk) and broad bean (green stalk)] were studied using the nylon net bag method in drylands and paddy fields. The results showed that the decomposition rate of straw was high at the early phase (0–60 d) which then dropped at the later phase (60–360 d). After 360 d, the cumulative decomposition rates of straw were 52.88%–75.80% and 45.01%–62.12% in drylands and paddy fields, respectively. The cumulative decomposition rate of broad bean was significantly lower than that of other crops in the two fields.

* 国家"十二五"科技支撑计划课题(2012BAD14B18)资助
** 通讯作者: 高明, 主要从事土壤质量与环境和土地整理方面的研究。E-mail: gaoming@swu.edu.cn
收稿日期: 2016-08-23　接受日期: 2016-11-07

* Supported by the National Key Technologies R&D Program of China (2012BAD14B18)
** Corresponding author, E-mail: gaoming@swu.edu.cn
Received Aug. 23, 2016; accepted Nov. 7, 2016

Furthermore, rapeseed and rice decomposed faster in drylands and paddy fields. At the endpoint of the experiment, the sequence of nutrient release rate of straw in the two fields was K > P > N > C. The rate of carbon release by rice, corn, wheat, rapeseed and broad bean straws was up to 87.37% in dryland and 69.57% in paddy field. The rates of carbon release by rapeseed and rice were significantly higher than those of other crop straws in dryland and paddy field. The average rate of nitrogen release by the five straws tracked the following trend: broad bean (69.72%) > rice (68.45%) > rapeseed (63.60%) > corn (57.28%) > wheat (54.64%) in dryland. The rate of nitrogen release by broad bean was the highest (77.11%) in the paddy field. The rates of release of phosphorus by straw were 89.65%–98.96% and 90.70%–96.80% in dryland and paddy field, respectively. Then the rate of release of phosphorus by wheat was persistently lower than that of any other straw in both fields. The rate of release of potassium by rapeseed was respectively 20.91%, 5.84%, 6.67% and 5.19% higher than that of wheat, rice, corn and broad bean in dryland. Also the rate of release of potassium by wheat was significantly lower than the others. Overall, the decomposition and nutrient release rates in dryland were higher than those in paddy field. Rapeseed green straw in dryland, and rice and maize straws in paddy field were more easily decomposed than other crops straws. The release rate of potassium was highest in all the tested elements.

Keywords: Crop straw; Decomposition characteristic; Nutrients release; Dryland; Paddy field

中国是农业大国，每年作物秸秆的产量超过 8 亿 t[1]，且秸秆中富含有机碳、氮、磷、钾以及中微量元素，是一种重要的生物资源。但我国秸秆的利用率低，有效还田率不到 1/3[2]，绝大部分被焚烧或者遗弃，不仅造成了资源的极大浪费，而且对生态环境造成了严重影响，进而影响了人类的生活质量[3]。因此，作物秸秆的合理利用成为一个亟待解决的农业问题。已有研究表明，作物秸秆还田后在微生物和酶的共同作用下进行腐解[4-5]，不仅能改善土壤物理性质[6]，还能释放氮、磷、钾等营养元素供植物吸收利用，提高土壤肥力[7]。近年来，为解决农业资源浪费和缓解化肥过量施用带来的土壤退化及农业面源污染问题[8-10]，利用秸秆等农业废弃物腐解释放养分，减少化肥施用量，已成为国内外学者关注的热点之一[11-15]。

前人对于还田秸秆的腐解规律进行了大量的研究。李新举等[16]研究表明，在不同填埋深度下秸秆腐解速率不同，表现为埋深 5 cm 最快，埋深 15 cm 次之，覆盖在地表最慢。张宇等[17]发现，耕作方式对还田秸秆的腐解规律有显著的影响，腐解率表现为翻耕>旋耕>免耕。Abro 等[18]指出，温度较低时有利于秸秆对有机碳和微生物量碳、氮的固持与保蓄，而在温度较高时会加速秸秆中有机碳的矿化。唐国勇等[19]通过对不同水分条件下 ^{14}C 秸秆降解研究发现淹水条件下水稻秸秆的分解率显著高于旱地。戴志刚等[15]研究表明，不同秸秆腐解率不同，在快速腐解期表现为油菜秸秆腐解率大于水稻秸秆和小麦秸秆，可能与秸秆的组织结构不同有关。前人对于还田秸秆的养分释放规律也进行了大量研究，但结果不尽相同，有研究发现，还田秸秆氮磷钾释放速率表现为钾素>磷素>氮素[20]。也有研究表明，作物秸秆中磷的释放率最大，氮次之，钾最小[21]。目前，大量研究集中在单一土地利用方式[22-23]、单一作物生长期[24-25]对还田秸秆腐解特征的影响上，且研究秸秆种类少[26]，而对紫色丘陵区不同土地利用方式下秸秆还田的腐解特征研究还鲜见报道。为此，本研究采用尼龙网袋法，以紫色丘陵区常见作物[水稻(*Oryza sativa*)、油菜(*Brassica campestris*)、玉米(*Zea mays*)、蚕豆(*Vicia faba*)、小麦(*Triticum aestivum*)]秸秆为研究对象，探讨不同土地利用方式下不同还田秸秆周年腐解特征和养分释放规律，以期为该地区农业秸秆循环利用和秸秆还田技术的确定提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验在国家紫色土土壤肥力与肥料效益监测站进行，监测站位于重庆市北碚区西南大学试验农场(30°26′N，106°26′E)，属紫色丘陵区，方山浅丘坳谷地形，海拔 266.3 m，属亚热带季风气候，年均温 18.4 ℃，年降水量 1 105.5 mm，日照 1 276.7 h。试验年(2014 年)夏季平均温 21.6 ℃，冬季平均温 14.2 ℃，高温集中在 7、8 月份，降雨主要集中在夏季和冬季，全年微风。供试土壤为侏罗纪沙溪庙组紫色泥页岩发育形成的紫色土，中性紫色土亚类，灰棕紫泥属。供试土壤基本理化性质见表 1。

1.2　供试秸秆

于 2014 年 5 月在重庆市北碚区西南大学周边农村采集 5 种成熟作物秸秆(水稻秸秆、小麦秸秆、玉米秸秆、油菜青秆、蚕豆青秆)，实验室洗净，油菜和蚕豆青秆杀青，全部风干，剪成 5~8 cm 小段，再 60 ℃烘干至恒重，一部分保存用于还田试验，另一部分粉碎过 1 mm 筛用于测定养分含量。秸秆样品基本性质见表 2。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

土地利用方式 Land use	pH	有机质 Organic matter (g·kg^{-1})	全氮 Total N (g·kg^{-1})	全磷 Total P (g·kg^{-1})	全钾 Total K (g·kg^{-1})	碱解氮 Available N (mg·kg^{-1})	有效磷 Available P (mg·kg^{-1})	速效钾 Available K (mg·kg^{-1})
旱地 Dryland	6.3	14.8	1.40	0.729	14.9	60.3	41.2	217
水田 Paddy	7.1	20.4	1.08	0.432	19.2	86.2	6.21	57.2

表 2 供试秸秆基本性质

Table 2 Basic properties of the tested straw samples

秸秆样品 Straw sample	碳 Carbon (g·kg^{-1})	氮 Nitrogen (g·kg^{-1})	磷 Phosphorus (g·kg^{-1})	钾 Potassium (g·kg^{-1})	碳氮比 C/N
小麦秸秆 Wheat straw	452.8	3.77	2.36	2.07	120.11
水稻秸秆 Rice straw	395.6	6.56	4.27	16.84	60.30
玉米秸秆 Corn straw	418.9	6.14	6.02	18.48	68.22
蚕豆青秆 Broad bean green stalk	392.8	7.38	4.56	7.95	53.22
油菜青秆 Rapeseed green stalk	385.5	7.94	7.07	32.18	48.55

1.3 试验设计

试验选取旱地(D)和水田(P)两种土壤，旱地种植制度为玉米-油菜套作，水田种植制度为水稻-小麦轮作，作物品种为当地主栽品种，种植作物期间施氮、磷、钾肥分别为尿素、过磷酸钙、硫酸钾，其中，种植水稻小麦以 60%氮肥和全部磷钾肥做基肥，40%氮肥为追肥，种植玉米油菜以 50%氮肥和全部磷钾肥做基肥, 50%氮肥为追肥。作物品种、种植时间及施肥量见表 3。

分别称取 10 g 左右 5~8 cm 的水稻秸秆(D-SD、P-SD)、小麦秸秆(D-XM、P-XM)、玉米秸秆(D-YM、P-YM)、油菜青秆(D-YC、P-YC)、蚕豆青秆(D-CD、P-CD)分别装在孔径为 40 目的纯尼龙袋中，共 10 个处理。在水田和旱地中分别随机选取 3 个 5 m×5 m 的样方，于 2014 年 5 月 30 日将装好秸秆的尼龙袋翻埋入旱地和水田的样方中，埋深 5 cm。每个样方中埋入 5 种秸秆尼龙袋各 7 个，不同秸秆填埋间距 1 m，分别在埋入后第 10 d、30 d、60 d、90 d、150 d、240 d 和 360 d 取样，每次在每个样方中随机取出 5 种秸秆各一袋，先用自来水冲净网袋上粘附的泥浆，再用蒸馏水冲洗 3 次，60 ℃烘干至恒重，称重，磨碎过 1 mm 筛后测定秸秆中的碳、氮、磷、钾含量，并计算养分释放率。

表 3 作物种植时间及施肥量

Table 3 Planting time and fertilization rates of crops

作物 Crop	品种 Variety	种植时间(年-月-日) Planting time (year-month-day)	收获时间(年-月-日) Harvest time (year-month-day)	施肥量 Fertilization rate (kg·hm^{-2})		
				N	P_2O_5	K_2O
玉米 Corn	正大 999 ZD999	2015-03-29	2015-08-12	225	112.5	112.5
油菜 Rapeseed	渝油 28 YY 28	2014-11-17	2015-05-05	225	112.5	112.5
水稻 Rice	Y 两优 1 号 YLY 1	2014-05-15	2014-08-25	150	60	60
小麦 Wheat	川麦 42 CM 42	2014-11-10	2015-05-02	135	60	60

1.4 样品测定与数据处理

1.4.1 样品测定

土壤基本理化性质采用常规分析方法[27]。秸秆有机碳采用重铬酸钾容量法-外加热法测定；秸秆通过 H_2SO_4-H_2O_2 溶液消煮后，采用凯氏定氮法测定全氮含量，采用钒钼黄比色法测定全磷含量，采用火焰光度法测定全钾含量[28]。

1.4.2 数据处理

秸秆累计腐解率、养分累计释放率[23]计算公式为:

$$\text{腐解率}(\%)=(M_o-M_t)/M_o\times100\% \quad (1)$$

$$\text{养分累计释放率}(\%)=(M_o\times C_o-M_t\times C_t)/M_o\times C_o \quad (2)$$

式中: M_o 为加入秸秆干重, g; M_t 为腐解时间 t 时的秸秆干重，g; t 为腐解时间，d; C_o 为秸秆原始养分含量，g·kg^{-1}; C_t 为腐解时间为 t 时秸秆养分含量，g·kg^{-1}。

数据采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件进行处理，采用 LSD 法和 T-检验对试验数据进行检验($P<0.05$)，采用 Microsoft Excel 2010 绘图。

2　结果分析

2.1　不同种类秸秆在旱地和水田中的腐解特征

由图 1a 可以看出, 5 种作物秸秆在旱地土壤中的累计腐解率均随腐解时间的延长而增大, 且表现出前期腐解速率快, 后期缓慢的规律, 其中 D-XM、D-SD 快速腐解期为 0~60 d, 平均腐解速率分别为 0.091 $g \cdot d^{-1}$ 和 0.095 $g \cdot d^{-1}$, 90~360 d 为缓慢期, 累计腐解率分别达 67.02%和 74.23%; D-YC、D-CD 快速腐解期为 0~30 d, 在 30 d 累计腐解率分别达 44.55%和 40.64%, 显著高于 D-XM、D-SD 和 D-YM(表 4); 0~10 d 为 D-YM 的快速腐解期, 腐解速率达 0.138 $g \cdot d^{-1}$, 30~360 d 为缓慢期, 腐解速率变幅为 0.020~0.064 1 $g \cdot d^{-1}$。5 种还田秸秆累计腐解率在试验结束时达高值, 大小顺序表现为 D-YC(75.80%)>D-SD(74.23%)>D-YM(69.34%)>D-XM(67.02%)>D-CD(52.88%), 且 D-CD 显著低于其他 4 种秸秆(表 4)。

由图 1b 可看出, 5 种作物秸秆在水田土壤中的腐解规律与旱地土壤中类似, 也表现为前期腐解快, 后期逐渐平稳的规律, 但是快速腐解期与旱地土壤中的还田秸秆有差异。P-XM 和 P-YM 快速腐解期为 0~90 d, 其中 P-XM 还田 10 d 后腐解率达 38.09%, 后逐渐提高, 在 90 d 时达最大累计腐解率 54.12%; 而 P-YM 在还田 90 d 后累计腐解率为 59.45%, 比 P-XM 提高了 9.84%。P-SD、P-YC 和 P-CD 快速腐解期为 0~60 d, 在 60 d 时累计腐解率分别为 55.75%、46.82%和 49.09%, 且 P-SD 显著高于 P-YC 和 P-CD (表 4)。P-XM、P-SD、P-YM、P-YC 和 P-CD 在 0~10 d 腐解最快, 腐解速率分别为 0.382 $g \cdot d^{-1}$、0.299 $g \cdot d^{-1}$、0.228 $g \cdot d^{-1}$、0.325 $g \cdot d^{-1}$ 和 0.361 $g \cdot d^{-1}$, 累计腐解率分别占试验结束时的 78.34%、46.84%、35.18%、64.36%和 77.29%。5 种秸秆在试验结束时累计腐解率表现为 P-SD>P-YM>P-XM>P-YC>P-CD, 且 P-SD 显著大于其余 4 种秸秆(表 4)。

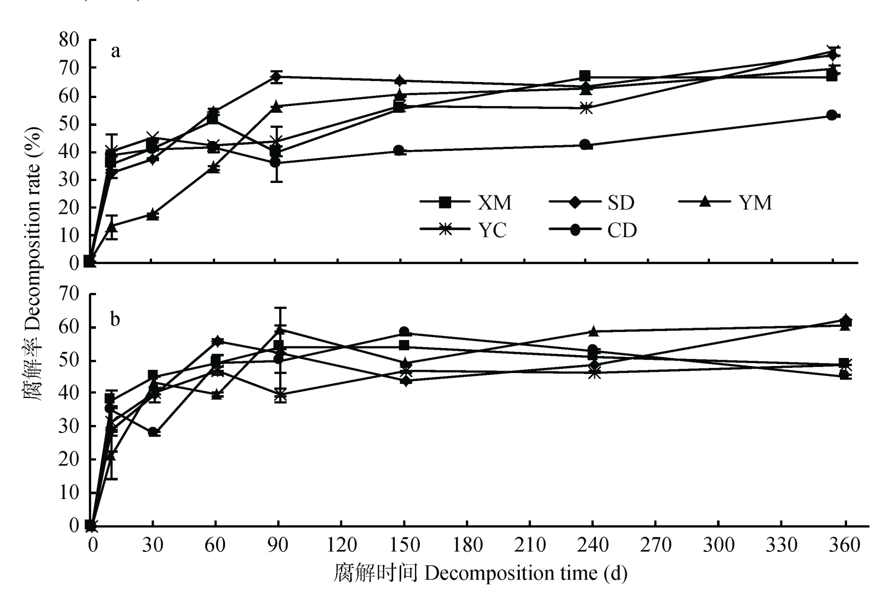


图 1　不同作物秸秆在旱地(a)和水田(b)中腐解率的变化特征

Fig.1　Variations of straw decomposition rates of different crops straws in dryland (a) and paddy field (b)

XM: 小麦秸秆; SD: 水稻秸秆; YM: 玉米秸秆; YC: 油菜青秆; CD: 蚕豆青秆。XM: wheat straw; SD: rice straw; YM: corn straw; YC: rapeseed green stalk; CD: broad bean green stalk.

同时, 还田秸秆在旱地和水田中腐解率也存在差异。P-XM 在腐解 90 d 达最大累计腐解率 54.12%, 是 D-XM 在 90 d 腐解率的 1.35 倍, 且显著低于 D-XM 在腐解 360 d 达最大累计腐解率 67.02%(表 4); P-SD、P-YM 和 P-YC 均在试验结束时分别达最大腐解率 62.12%、60.59%和 48.58%, 分别为旱地土壤中相同秸秆最大累计腐解率的 83.68%、87.38%和 64.08%。试验结束时, 旱地土壤中 D-XM、D-SD、D-YM、D-YC 和 D-CD 累计腐解率均高于水田, 分别是水田土壤中的 1.37 倍、1.19 倍、1.14 倍、1.56 倍和 1.17 倍。表明旱地土壤更有利于小麦、水稻、玉米、油菜和蚕豆秸秆的腐解。

2.2　不同种类秸秆在旱地和水田中的碳释放特征

5 种还田秸秆在旱地和水田中的碳释放特征如图 2。不同秸秆之间累计碳释放率不同, 旱地和水田中秸秆的碳释放率也不同。由图 2a 所示, 5 种秸秆在旱地土壤中翻埋腐解后碳累计释放率整体上呈现先快速提高后缓慢提高的趋势, 拐点出现在 60~90 d, 且 5 种秸秆在拐点处碳累计释放率变幅介于 52.99%~70.60%。D-XM 在腐解 10 d 后碳释放率为 40.32%,

表 4 不同秸秆在旱地和水田中不同时间的腐解率差异显著性分析

Table 4 Significance of difference in decomposition rates of different crops straws at different times in dryland and paddy field

秸秆种类 Type of straws	旱地 Dryland							水田 Paddy field						
	10 d	30 d	60 d	90 d	150 d	240 d	360 d	10 d	30 d	60 d	90 d	150 d	240 d	360 d
小麦 Wheat	Aa	Ab	Aa	Bc	Ad	Aa	Ab	Aa	Aa	Ab	Aa	Ab	Bc	Bc
水稻 Rice	Aa	Ac	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Aab	Ab	Aa	Bab	Be	Bd	Ba
玉米 Corn	Aa	Bd	Bc	Ab	Ab	Ab	Ab	Ab	Aab	Ac	Aa	Bc	Ba	Ab
油菜 Rapeseed	Aa	Aa	Bb	Ac	Ac	Ac	Aa	Aab	Bb	Ab	Ab	Bd	Be	Bc
蚕豆 Broad bean	Aa	Ab	Ab	Ac	Be	Bd	Ac	Aa	Bc	Ab	Aab	Aa	Ab	Bd

同列不同小写字母表示不同秸秆腐解率在 0.05 水平上差异性显著。相同秸秆和腐解时间下，同行不同大写字母表示秸秆在旱地和水田中腐解率在 0.05 水平上差异性显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different straws at 0.05 level. Different capital letters in the same line indicate significant differences between dryland and paddy field for the same straw at the same decomposition time at 0.05 level.

0~60 d 为其碳快速释放期，60 d 后碳释放率缓慢提高，且在试验结束时达最大值 75.98%。D-SD、D-YM 和 D-YC 在 0~90 d 内实现碳的快速释放，在 90 d 时累计释放率分别为 66.02%、63.45%和 70.6%，分别占旱地土壤中水稻秸秆碳释放量的 89.34%、85.22%和 80.81%。在整个腐解过程中, D-XM、D-SD、D-YM、D-YC 和 D-CD 的碳累计释放量均在腐解 360 d 后达最大值，表现为 D-YC>D-XM>D-YM>D-SD>D-CD，且 D-YC 碳累计释放量显著高于其余 4 种秸秆(表 5)，分别是 D-XM、D-YM、D-SD 和 D-CD 的 1.14 倍、1.18 倍、1.17 倍和 1.33 倍。

由图 2b 所示，水田中 5 种秸秆碳累计释放率也呈现随腐解时间的增加先快速提高后缓慢提高的规律，且 5 种秸秆碳快速释放期为 0~60 d，缓慢释放期为 60~360 d。P-XM、P-SD、P-YM、P-YC 和 P-CD 在腐解 60 d 后碳累计释放率为 50.92%、62.13%、43.84%、47.93%和 51.86%，分别占秸秆最大碳累计释放量的 80.91%、89.31%、66.72%、92.19%和 84.12%。P-YM 在快速释放期碳释放量低于其余 4 种秸秆，但在腐解 90 d 和 240 d 其碳释放量高于其余秸秆，且在腐解 240 d 后分别比 P-XM、P-SD、P-YC 和 P-CD 提高了 10.72%、8.75%、26.24%和 8.02%。在试验结束后 P-SD 碳释放量显著高于其余 4 种秸秆，大小顺序表现为 P-SD(69.57%)>P-YM(65.70%)>P-XM(52.51%)>P-YC(51.99%)>P-CD(49.95%)。

不同土地利用方式下还田秸秆碳释放规律也不尽相同。0~10 d 5 种秸秆碳释放率差异不大，除油菜秸秆外，均表现出水田中释放率大于旱地中。小麦秸秆在水田土壤中腐解 150 d 达到最大碳累计释放率，而在旱地土壤中腐解 360 d 达到最大值，且显著高于水田土壤中碳释放率(表 5)。在整个试验阶段，表现出秸秆在旱地土壤中的碳累计释放量高于水田

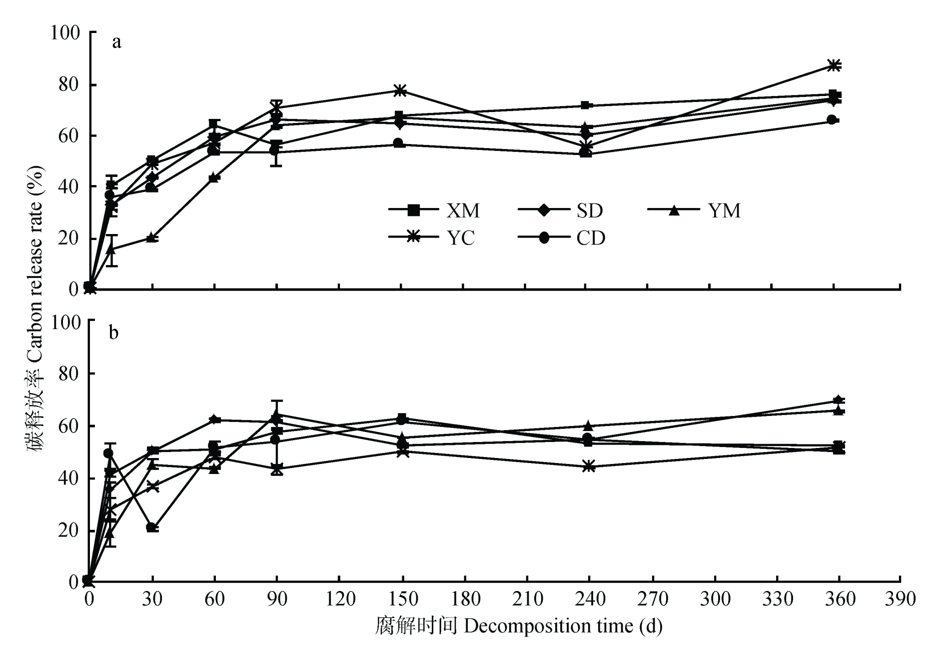


图 2 不同秸秆在旱地(a)和水田(b)中碳释放率的变化特征

Fig. 2 Variations of carbon release rates of different crops straws in dryland (a) and paddy field (b)

XM: 小麦秸秆; SD: 水稻秸秆; YM: 玉米秸秆; YC: 油菜青秆; CD: 蚕豆青秆。XM: wheat straw; SD: rice straw; YM: corn straw; YC: rapeseed green stalk; CD: broad bean green stalk.

表 5　不同秸秆在旱地和水田中不同时间碳释放率显著性差异分析

Table 5　Significance of difference in carbon release rates of different crops straws at different times in dryland and paddy field

秸秆种类 Type of straws	旱地 Dryland							水田 Paddy field						
	10 d	30 d	60 d	90 d	150 d	240 d	360 d	10 d	30 d	60 d	90 d	150 d	240 d	360 d
小麦 Wheat	Aa	Aa	Aa	Ac	Ab	Aa	Ab	Aab	Aa	Abc	Aa	Ba	Bc	Bc
水稻 Rice	Aa	Bc	Ab	Aab	Ad	Ac	Ac	Ab	Aa	Aa	Aa	Bd	Bb	Aa
玉米 Corn	Ab	Bc	Ad	Ab	Ac	Ab	Abc	Ac	Ab	Ad	Aa	Bc	Ba	Bb
油菜 Rapeseed	Aa	Ab	Ab	Aa	Aa	Ad	Aa	Abc	Bc	Bc	Bb	Be	Bd	Bc
蚕豆 Broad bean	Aa	Ad	Ac	Ac	Be	Be	Ad	Aa	Bd	Ab	Aab	Ab	Ab	Bd

同列不同小写字母表示不同秸秆腐解率在 0.05 水平上差异性显著。相同秸秆和腐解时间下, 同行不同大写字母表示秸秆在旱地和水田中腐解率在 0.05 水平上差异性显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different straws at 0.05 level. Different capital letters in the same line indicate significant differences between dryland and paddy field for the same straw at the same decomposition time at 0.05 level.

土壤, 且在试验结束时, 旱地土壤中小麦、水稻、玉米、油菜和蚕豆秸秆碳累计释放量分别比水田增加 44.69%、6.21%、13.31%、68.05%和 31.13%, 可能是旱地微生物活性更强, 使秸秆碳释放量大于水田。

2.3　不同种类秸秆在旱地和水田中的氮释放特征

5 种还田秸秆在旱地和水田中氮释放规律如图 3 所示, 氮释放特征总体上与碳类似, 但也存在差异。从图 3a 可看出, 5 种供试秸秆在旱地土壤中翻埋腐解过程中, 其氮累计释放率总体上随腐解时间的增加表现出先快速提高后缓慢下降的趋势。D-YC 在整个腐解过程无明显拐点, 氮累计释放率在腐解 10 d 后为 29.95%, 在腐解 360 d 后达最大值 63.60%, 分别是 30 d、60 d、90 d、150 d、240 d 累计释放率的 4.02 倍、2.19 倍、2.07 倍、1.36 倍、1.95 倍。D-XM、D-SD、D-YM、D-CD 在 0~30 d 实现氮的快速释放, 变幅为 52.30%~76.62%。在试验结束时, 5 种秸秆氮累计释放率差异较大, 表现为 D-CD(69.72%)>D-SD(68.45%)>D-YC(63.60%)>D-YM(57.28%)>D-XM(54.64%), 且 D-XM 显著低于其余 4 种秸秆(表 6)。

如图 3b 所示, 5 种秸秆氮快速释放期为 0~30 d, 缓慢释放期为 60~360 d。在快速释放期氮释放率表现为 P-YC>P-SD>P-CD>P-YM>P-XM, 其中 P-YC 氮释放率是 P-XM 的 1.21 倍。在试验结束时, 5 种供试秸秆氮累计释放率差异达显著水平(表 6), 蚕豆秸秆氮释放率最大为 77.11%, 其次是水稻秸秆 64.15%, 油菜秸秆最小, 仅为 32.89%, 小麦、水稻、玉米、油菜和蚕豆秸秆氮累计释放率分别占秸秆氮释放率的 70.98%、100%、86.43%、52.39%和 95.99%。

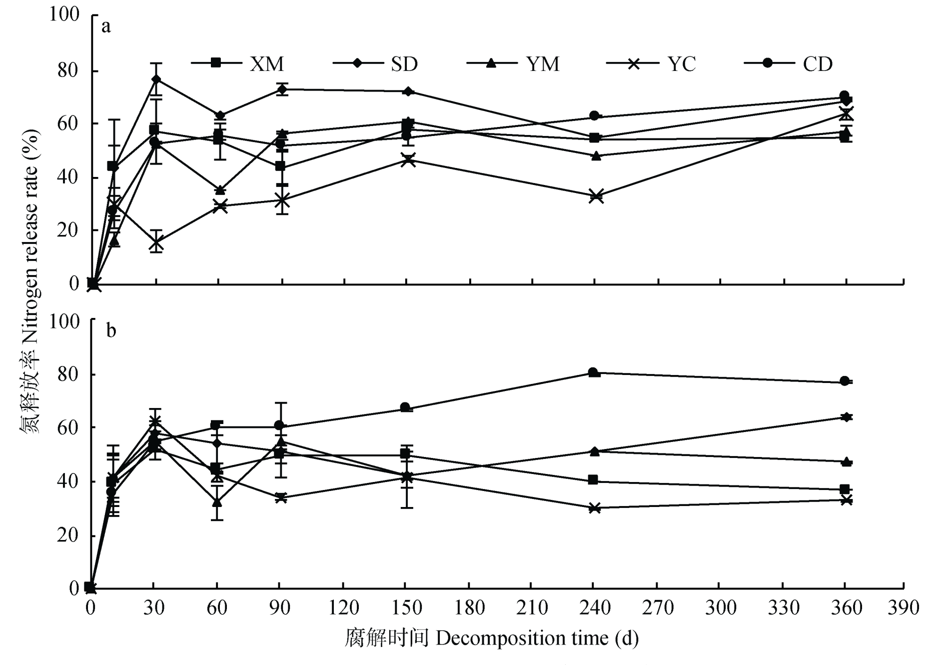


图 3　不同秸秆在旱地(a)和水田(b)中氮释放率的变化特征

Fig. 3　Variations of nitrogen release rates of different crops straws in dryland (a) and paddy field (b)

XM: 小麦秸秆; SD: 水稻秸秆; YM: 玉米秸秆; YC: 油菜青秆; CD: 蚕豆青秆。XM: wheat straw; SD: rice straw; YM: corn straw; YC: rapeseed green stalk; CD: broad bean green stalk.

表 6 不同秸秆在旱地和水田中不同时间氮释放率显著性差异分析

Table 6 Significance of difference in nitrogen release rates of different crops straws at different times in dryland and paddy field

秸秆种类 Type of straw	旱地 Dryland							水田 Paddy field						
	10 d	30 d	60 d	90 d	150 d	240 d	360 d	10 d	30 d	60 d	90 d	150 d	240 d	360 d
小麦 Wheat	Aa	Aa	Ab	Ac	Ab	Ab	Ad	Aa	Ab	Ab	Aab	Ab	Bc	Bd
水稻 Rice	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	Aab	Aab	Aa	Ab	Ab	Ab
玉米 Corn	Aa	Aa	Ac	Ab	Ab	Bc	Ac	Aa	Aab	Ac	Aa	Ab	Ab	Ac
油菜 Rapeseed	Aa	Ab	Bc	Ad	Ac	Ad	Ab	Aa	Aa	Abc	Ab	Ab	Bd	Be
蚕豆 Broad bean	Aa	Ba	Aab	Abc	Ab	Ba	Ba	Aa	Aab	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa

同列不同小写字母表示不同秸秆腐解率在 0.05 水平上差异性显著。相同秸秆和腐解时间下，同行不同大写字母表示秸秆在旱地和水田中腐解率在 0.05 水平上差异性显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different straws at 0.05 level. Different capital letters in the same line indicate significant differences between dryland and paddy field for the same straw at the same decomposition time at 0.05 level.

旱地和水田中还田秸秆氮释放特征存在差异。油菜秸秆翻埋腐解 30 d 后，在水田土壤中氮累计释放率为 62.77%，而在旱地土壤中为 15.82%，仅为水田的 25.20%。在腐解 360 d 后，小麦秸秆在旱地中累计腐解率为 54.64%，是水田中的 1.48 倍。总体上，试验结束时，5 种供试秸秆在旱地中氮累计释放率大于水田，这可能是旱地中秸秆腐解量大于水田导致的。

2.4 不同种类秸秆在旱地和水田中的磷释放特征

如图 4 所示，秸秆腐解后磷释放率随腐解时间的增加表现前期快速提高，后期基本保持稳定的规律，与碳、氮释放规律明显不同。由图 4a 可看出，秸秆在旱地中翻埋腐解后，0~60 d 为磷素快速释放期，D-XM、D-SD、D-YM、D-YC 和 D-CD 磷累计释放率分别为 83.95%、95.59%、95.64%、97.22%和 95.68%，且小麦秸秆磷累计释放率显著低于其余 4 种秸秆(表 7)。在 60~360 d 为平稳释放期，5 种秸秆磷累计释放率均无明显变化。在试验结束时，磷累计释放率变幅为 89.65%~98.96%，大小顺序为 D-YC>D-YM>D-SD>D-CD>D-XM。在整个试验过程中，D-XM 秸秆磷累计释放率始终低于其余 4 种秸秆，这可能与秸秆本身的结构有关。

如图 4b 所示，秸秆在水田中磷释放特征与旱地中相似，0~60 d 为快速释放阶段，在快速释放阶段几乎实现秸秆磷的完全释放，是因为 60~360 d 秸秆腐解量很少。在快速腐解阶段 5 种秸秆磷累计释放率差异不大，变幅为 92.04%~97.16%。在试验结束时 5 种秸秆磷累计释放率变化差异仅为 6.10%，但达显著水平(表 7)，P-YM 磷累计释放率最大为 96.50%，分别比 P-YC、P-CD、P-SD、P-XM 提高了 6.73%、2.11%、0.31%和 1.49%。

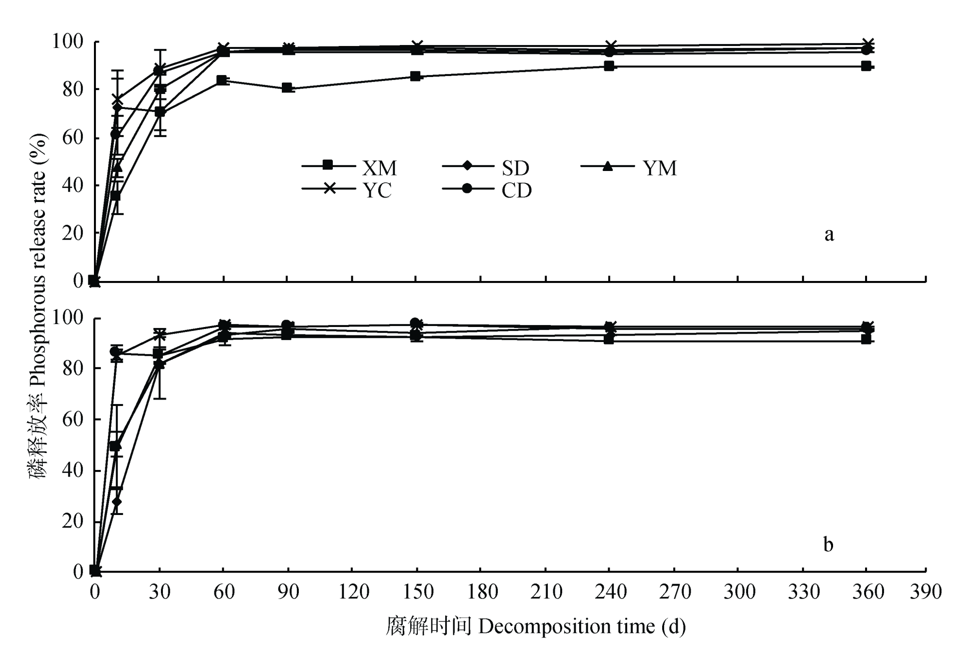


图 4 不同秸秆在旱地(a)和水田(b)中磷释放率的变化特征

Fig. 4 Variations of phosphorus release rates of different crops straws in dryland (a) and paddy field (b)

XM：小麦秸秆；SD：水稻秸秆；YM：玉米秸秆；YC：油菜青秆；CD：蚕豆青秆。XM: wheat straw; SD: rice straw; YM: corn straw; YC: rapeseed green stalk; CD: broad bean green stalk.

表 7　不同秸秆在旱地和水田中不同时间磷释放率显著性差异分析
Table 7　Significance of difference in phosphorus release rates of different crops straws at different times in dryland and paddy field

秸秆种类 Type of straw	旱地 Dryland							水田 Paddy field						
	10 d	30 d	60 d	90 d	150 d	240 d	360 d	10 d	30 d	60 d	90 d	150 d	240 d	360 d
小麦 Wheat	Aa	Ab	Ab	Bc	Bc	Be	Ad	Aab	Aa	Ab	Ab	Ab	Ae	Ae
水稻 Rice	Aa	Ab	Aa	Aab	Aab	Ac	Ab	Ab	Aa	Aab	Ab	Bb	Bd	Bd
玉米 Corn	Aa	Aab	Aa	Aab	Aa	Ab	Ab	Aab	Aa	Aab	Aab	Aab	Aa	Aa
油菜 Rapeseed	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Bb	Bb
蚕豆 Broad bean	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	Bd	Ac	Aa	Aa	Aab	Aa	Aa	Ac	Bc

同列不同小写字母表示不同秸秆腐解率在 0.05 水平上差异性显著。相同秸秆和腐解时间下，同行不同大写字母表示秸秆在旱地和水田中腐解率在 0.05 水平上差异性显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different straws at 0.05 level. Different capital letters in the same line indicate significant differences between dryland and paddy field for the same straw at the same decomposition time at 0.05 level.

秸秆在旱地和水田的磷释放特征均在腐解 60 d 后几乎实现磷的完全释放，但在旱地和水田中磷的累计释放率不同，其中小麦秸秆腐解 60 d 后，在水田中磷累计释放率为 92.04%，比旱地中的提高了 9.64%。在腐解 10 d 后，秸秆在水田中磷的释放率大于旱地中，5 种秸秆增加量变化为 3.05%~25.21%；在试验结束时秸秆在旱地和水田中磷累计释放速率无明显差异。

2.5　不同种类秸秆在旱地和水田中的钾释放特征

从图 5 可看出，秸秆钾释放特征与磷类似，也表现钾累计释放率在快速释放期达较大值，在后期无明显变化。由图 5a 所示，D-YC 在腐解 60 d 出现拐点，D-XM、D-SD、D-YM、D-CD 在腐解 30 d 出现拐点，且拐点处钾累计释放率无明显差异，变幅为 89.39%~99.06%。在平稳释放阶段，D-XM 钾累计释放率显著低于其余 4 种秸秆(P<0.05)。试验结束时，D-YC 钾累计释放率最大为 96.63%，分别比 D-XM、D-SD、D-YM、D-CD 增加了 20.91%、5.84%、6.67%和 5.19%。

由图 5b 可看出，5 种秸秆在水田中钾快速释放期为 0~30 d，60~360 d 为平稳释放期。腐解 30 d 后，P-XM、P-SD、P-YM、P-YC、P-CD 钾累计释放率分别为 96.54%、95.53%、96.30%、99.03%、98.66%。在腐解 150 d 后，钾累计腐解率出现略微下降的趋势。在试验结束时 P-XM、P-SD、P-YM、P-YC、P-CD 分别占其最大钾累计释放率的 80.22%、92.33%、88.73%、91.20%、91.69%，且大小顺序表现为 P-CD>P-YC>P-SD>P-YM>P-XM，其中小麦秸秆累计钾释放率显著低于其余秸秆(表 8)。

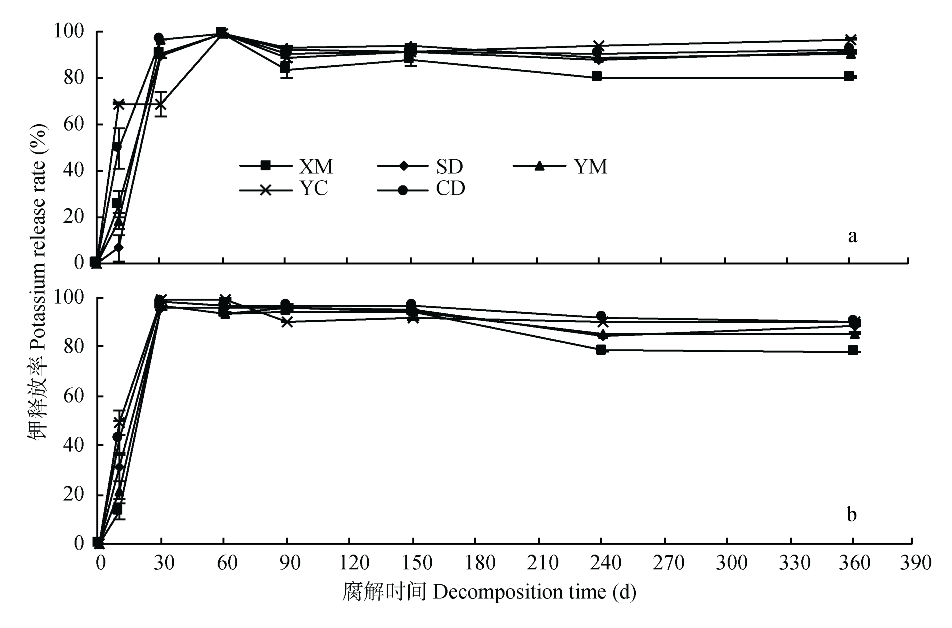


图 5　不同秸秆在旱地(a)和水田(b)中钾释放率的变化特征
Fig. 5　Variations of potassium release rates of different crop straws in dryland (a) and paddy field (b)
XM：小麦秸秆；SD：水稻秸秆；YM：玉米秸秆；YC：油菜青秆；CD：蚕豆青秆。XM: wheat straw; SD: rice straw; YM: corn straw; YC: rapeseed green stalk; CD: broad bean green stalk.

表 8 不同秸秆在旱地和水田中不同时间钾释放率显著性差异分析

Table 8 Analysis on difference of potassium release rates of different crop straws at different times in dryland and paddy field

秸秆种类 Type of straw	旱地 Dryland							水田 Paddy field						
	10 d	30 d	60 d	90 d	150 d	240 d	360 d	10 d	30 d	60 d	90 d	150 d	240 d	360 d
小麦 Wheat	Ab	Ab	Aa	Ab	Ab	Ae	Ad	Ab	Bb	Bc	Ab	Ac	Be	Ad
水稻 Rice	Ab	Bb	Aa	Aa	Aa	Ad	Ab	Aab	Ac	Bb	Aa	Ab	Bd	Bb
玉米 Corn	Ab	Aab	Aa	Aa	Aa	Ac	Ac	Ab	Abc	Bd	Aab	Ac	Bc	Bc
油菜 Rapeseed	Aa	Ac	Aa	Ba	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ac	Ad	Bb	Ba
蚕豆 Broad bean	Aab	Ba	Aa	Aa	Aa	Bb	Ab	Aab	Aa	Bb	Aa	Aa	Aa	Ba

同列不同小写字母表示不同秸秆腐解率在 0.05 水平上差异性显著。相同秸秆和腐解时间下，同行不同大写字母表示秸秆在旱地和水田中腐解率在 0.05 水平上差异性显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different straws at 0.05 level. Different capital letters in the same line indicate significant differences between dryland and paddy field for the same straw at the same decomposition time at 0.05 level.

3 讨论

3.1 不同土地利用方式对不同种类秸秆腐解特征的影响

影响作物还田腐解率和各期平均腐解量的因素众多，包括秸秆自身性状、耕作方式、还田深度、土壤理化性质、气候等。秸秆腐解过程主要靠微生物的分解作用，在众多影响因素中，有直接因素，也有些通过影响微生物的活动来影响秸秆腐解过程的间接因素。已有研究表明，作物秸秆在土壤中的腐解过程通常分为快速腐解期和缓慢腐解期两个阶段。快速腐解阶段是指腐解开始的前期一段时间，由于作物秸秆中可溶性有机化合物以及部分类似有机物的分解促使作物秸秆质量的大幅度减少，缓慢腐解阶段则是相对于快速腐解阶段的试验后期，由第一阶段未受到分解或分解不完全的木质素、单宁和蜡质等物质通过物理化学变化进行逐步缓慢分解的过程，往往可长达一年或更长时间[20-21,29]。

本研究中，5 种秸秆腐解率随腐解时间的增加整体上呈上升趋势，这与前人研究结果一致[22]。有研究表明，秸秆腐解率随着腐解时间的增加呈稳定增加的趋势，但本研究中秸秆腐解率随着腐解时间的增加会出现轻微降低的情况，这可能是由于供试秸秆大小、重量不一致，而体积小的秸秆，比表面积大，更容易与土壤环境中微生物和酶接触，分解速率更快，这与 Hassink[30]的研究结果相似。旱地土壤中小麦、水稻秸秆腐解率表现为前期快(0~60 d)，后期平稳(60~360 d)，水田土壤中小麦、水稻、玉米和油菜秸秆在 60 d 后达到腐解平稳，而蚕豆秸秆在 90 d 后达到。主要是因为试验前 60 d(6~8 月)气温较高，尤其是地面温度，从而导致土壤温度较高，微生物活动较强，并且此阶段降雨丰富，因此能够促进秸秆快速腐解，9 月以后气温逐渐回落，土壤温度随之降低，微生物活动也大大减弱，使秸秆分解速度减慢，进入越冬期间秸秆几乎停止腐解，到来年的 3、4 月份气温虽然回升，但由于秸秆自身的蛋白质、水溶性物和半纤维素等易分解物质几乎分解殆尽，残留的木质素、纤维素等难分解物质使秸秆腐解率不再提高。另外，无论是在水田还是旱地环境下，玉米秸秆腐解率在快速腐解期均明显低于其余 4 种秸秆，这与前人研究结论不一样[23,31]。由于秸秆的 C/N 也会影响其腐解速率[31]，本试验中玉米秸秆 C/N 高于水稻、油菜和蚕豆秸秆，而与小麦秸秆腐解率的差异还需进一步研究。

旱地和水田环境相比较，5 种秸秆腐解率均表现为旱地>水田。旱地环境下土壤处于好气状态，水田环境则处于厌氧状态。王景等[32]研究发现，小麦秸秆中的纤维素、半纤维素和木质素残留量总体均随培养时间延长逐渐降低，且好气条件更有利于纤维素、半纤维素和木质素的降解。因此，旱地较水田环境更有利于作物秸秆腐解。

3.2 不同土地利用方式对不同秸秆养分释放特征的影响

秸秆还田后通过土壤微生物的作用进行腐解并释放出供作物吸收利用的氮、磷、钾养分以及中微量营养元素[33]。因此，秸秆还田已被广泛认为是改善土壤理化性状以及提高土壤肥力的有效措施。有研究发现，豆科绿肥在土壤中腐解前期(1 个月)养分呈暴发式释放[34-35]，这与本研究所得结果相似，作物秸秆在旱地环境下腐解释放碳、氮、磷、钾养分的快速阶段分别为 0~90 d、0~30 d、0~60 d 和 0~30 d，水田环境下腐解释放碳、氮、磷、钾养分的快速阶段分别为 0~60 d、0~30 d、0~60 d 和 0~30 d。本研究中，秸秆释放碳、氮、磷、钾养分总体上随腐解时间增加呈现升高并趋于稳定的趋势，这与前人研究结果一致[15]，但碳氮养分随腐解时间的增加也

出现下降的情况，这可能是由于在该阶段施用化肥(尿素)，为微生物提供了大量的碳源和养分，微生物对秸秆中养分的需求较弱[36]，导致养分释放率降低。

已有研究认为秸秆还田腐解养分释放速率表现为钾>磷>氮>碳[15,23]，这与本研究结果一致。营养元素在秸秆中的形态是决定其释放速度快慢的关键。钾素在秸秆中含量较高且多以离子态存在，磷素中60%以离子态存在，其余参与细胞壁的构成，释放速率慢于钾素，且秸秆中磷素少于钾素。而碳、氮在秸秆中主要以有机态存在，以秸秆主体部分存在，胶结程度高，在物理作用下不易分解，因此释放较慢[22,37]。而试验结束作物秸秆最终元素释放以磷的释放最多，其次是钾、碳和氮释放相对较少。

王景等[32]研究发现，好气条件相对于厌氧更有利于小麦秸秆的碳、氮的释放。是因为厌氧条件抑制土壤中好氧微生物的活性，降低微生物的呼吸强度，从而导致秸秆养分释放速率较低。对比本研究中旱地和水田环境碳、氮、磷、钾最终释放大小顺序，可得出相似结论。

4　结论

在本试验中，不同秸秆(小麦秸秆、水稻秸秆、玉米秸秆、油菜青秆、蚕豆青秆)在旱地和水田中腐解率不同，埋入后 30~60 d 为快速腐解期，试验结束后，5 种秸秆累计腐解量较大(超过 50%)，旱地秸秆累计腐解率大小表现为油菜>水稻>玉米>小麦>蚕豆，水田表现为水稻>玉米>小麦>油菜>蚕豆，且秸秆在旱地中累计腐解率均大于水田。

不同秸秆在腐解初期磷钾释放迅速，超过 90%，在旱地和水田中养分释放率表现为钾>磷>氮>碳，且在旱地中累计释放率高于水田。

参考文献　References

[1] 王亚静，毕于运，高春雨．中国秸秆资源可收集利用量及其适宜性评价[J]．中国农业科学, 2010, 43(9): 1852–1859
Wang Y J, Bi Y Y, Gao C Y. Collectable amounts and suitability evaluation of straw resource in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(9): 1852–1859

[2] 姜超强，郑青松，祖朝龙，等．秸秆还田对土壤钾素的影响及其替代钾肥效应研究进展[J]．生态学杂志，2015，34(4): 1158–1165
Jiang C Q, Zheng Q S, Zu C L. Research progress on effects of straw returning on soil potassium and its substitute for potassium fertilizer[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(4): 1158–1165

[3] Li L J, Wang Y, Zhang Q, et al. Wheat straw burning and its associated impacts on Beijing air quality[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 51(3): 403–414

[4] Becker R, Bubner B, Remus R, et al. Impact of multi-resistant transgenic Bt maize on straw decomposition and the involved microbial communities[J]. Applied Soil Ecology, 2014, 73: 9–18

[5] Ji B Y, Hu H, Zhao Y L, et al. Effects of deep tillage and straw returning on soil microorganism and enzyme activities[J]. Scientific World Journal, 2014, 2014: 451493

[6] 张鹏，贾志宽，王维，等．秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J]．中国农业科学，2012，45(8): 1513–1520
Zhang P, Jia Z K, Wang W, et al. Effects of straw returning on characteristics of soil aggregates in semi-arid areas in southern Ningxia of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(8): 1513–1520

[7] 徐国伟，段骅，王志琴，等．麦秸还田对土壤理化性质及酶活性的影响[J]．中国农业科学, 2009, 42(3): 934–942
Xu G W, Duan H, Wang Z Q, et al. Effect of wheat-residue application on physical and chemical characters and enzymatic activities in soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(3): 934–942

[8] Streets D G. Black smoke in China and its climate effects[J]. Asian Economic Papers, 2005, 4(2): 1–23

[9] Bijay-Singh, Shan Y H, Johnson-Beebout S E, et al. Crop residue management for lowland rice-based cropping systems in Asia[J]. Advances in Agronomy, 2008, 98: 117–199

[10] 李继福，鲁剑巍，任涛，等．稻田不同供钾能力条件下秸秆还田替代钾肥效果[J]．中国农业科学, 2014, 47(2): 292–302
Li J F, Lu J W, Ren T, et al. Effect of straw incorporation substitute for K-fertilizer under different paddy soil K supply capacities[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(2): 292–303

[11] 赵玉芬，尹应武．我国肥料使用中存在的问题及对策[J]．科学通报, 2015, 60(36): 3527–3534
Zhao Y F, Yin Y W. Key scientific problems on establishing green fertilizer ensurance system[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(36): 3527–3534

[12] 杨志臣，吕贻忠，张凤荣，等．秸秆还田和腐熟有机肥对水稻土培肥效果对比分析[J]．农业工程学报，2008，24(3): 214–218
Yang Z C, Lü Y Z, Zhang F R, et al. Comparative analysis of the effects of straw-returning and decomposed manure on paddy soil fertility betterment[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 214–218

[13] 詹其厚，袁朝良，张效朴．有机物料对砂姜黑土的改良效应及其机制[J]．土壤学报, 2003, 40(3): 420–425
Zhan Q H, Yuan C L, Zhang X P. Ameliorative effect and mechanism of organic materials on vertisol[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(3): 420–425

[14] Shibu M E, Leffelaar P A, Van Keulen H, et al. Quantitative description of soil organic matter dynamics — A review of approaches with reference to rice-based cropping systems[J]. Geoderma, 2006, 137(1/2): 1–18

[15] 戴志刚，鲁剑巍，李小坤，等．不同作物还田秸秆的养分释

放特征试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 272–276
Dai Z G, Lu J W, Li X K, et al. Nutrient release characteristic of different crop straws manure[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 271–276
[16] 李新举, 张志国, 李贻学. 土壤深度对还田秸秆腐解速度的影响[J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 135–138
Li X J, Zhang Z G, Li Y X. Effects of soil depth on decay speed of straw[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(1): 135–138
[17] 张宇, 陈阜, 张海林, 等. 耕作方式对玉米秸秆腐解影响的研究[J]. 玉米科学, 2009, 17(6): 68–73
Zhang Y, Chen F, Zhang H L, et al. Tillage effects of decomposed ratio on corn straw[J]. Journal of Maize Sciences, 2009, 17(6): 68–73
[18] Abro S A, 把余玲, 田霄鸿, 等. 温度与微生物制剂对小麦秸秆腐解及土壤碳氮的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(1): 115–122
Abro S A, Ba Y L, Tian X H, et al. Effect of temperature and microbial agent on wheat straw decomposition and soil carbon or nitrogen[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2012, 40(1): 115–122
[19] 唐国勇, 童成立, 苏以荣, 等. 含水量对 ^{14}C 标记秸秆和土壤原有有机碳矿化的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(3): 538–543
Tang G Y, Tong C L, Su Y R, et al. Effects of soil moisture content on the mineralization of added ^{14}C-labelled straw and native soil organic carbon in upland soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(3): 538–543
[20] 李逢雨, 孙锡发, 冯文强, 等. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 374–380
Li F Y, Sun X F, Feng W Q, et al. Nutrient release patterns and decomposing rates of wheat and rapeseed straw[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(2): 374–380
[21] 王允青, 郭熙盛. 不同还田方式作物秸秆腐解特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 607–610
Wang Y Q, Guo X S. Decomposition characteristics of crop-stalk under different incorporation methods[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(3): 607–610
[22] 武际, 郭熙盛, 王允青, 等. 不同水稻栽培模式和秸秆还田方式下的油菜、小麦秸秆腐解特征[J]. 中国农业科学, 2011, 44(16): 3351–3360
Wu J, Guo X S, Wang Y Q, et al. Decomposition characteristics of rapeseed and wheat straws under different rice cultivations and straw mulching models[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(16): 3351–3360
[23] 岳丹, 蔡立群, 齐鹏, 等. 小麦和玉米秸秆不同还田量下腐解特征及其养分释放规律[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(3): 80–85
Yue D, Cai L Q, Qi P, et al. The decomposition characteristics and nutrient release laws of wheat and corn straws under different straw-returned amount[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(3): 80–85
[24] 胡宏祥, 程燕, 马友华, 等. 油菜秸秆还田腐解变化特征及其培肥土壤的作用[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 297–302
Hu H X, Cheng Y, Ma Y H, et al. Decomposition characteristics of returned rapeseed straw in soil and effects on soil fertility[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(3): 297–302
[25] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 565–575
Wu J, Guo X S, Lu J W, et al. Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 565–575
[26] 徐健程, 王晓维, 朱晓芳, 等. 不同绿肥种植模式下玉米秸秆腐解特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 48–58
Xu J C, Wang X W, Zhu X F, et al. Study on decomposition of maize straw under different green manure cropping patterns[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(1): 48–58
[27] 鲁如坤. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1999
Lu R K. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999
[28] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Science Press, 2000
[29] 匡恩俊, 迟凤琴, 宿庆瑞, 等. 三江平原地区不同有机物料腐解规律的研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 736–741
Kuang E J, Chi F Q, Su Q R, et al. Decomposition regularity of organic materials in Sanjiang Plain region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4): 736–741
[30] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles[J]. Plant and Soil, 1997, 191(1): 77–87
[31] 寇太记, 刘世亮, 介晓磊, 等. 砂土中有机物质腐解与有机质调控[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 244–248
Kou T J, Liu S L, Jie X L, et al. Decomposition and management of organic matters in sandy soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(2): 244–248
[32] 王景, 陈曦, 张雅洁, 等. 好气和厌氧条件下小麦秸秆的腐解特征研究[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(3): 161–168
Wang J, Chen X, Zhang Y J, et al. Characteristic of wheat straw decomposition under aerobic and anaerobic condition in soil[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(3): 161–168
[33] 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 87–91
Han L J, Yan Q J, Liu X Y, et al. Straw resources and their utilization in China[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(3): 87–91
[34] 杨芳, 田霄鸿, 陆欣春, 等. 小麦秸秆腐解对自身锌释放及

土壤供锌能力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1188–1196
Yang F, Tian X H, Lu X C, et al. Effects of application of wheat straw on straw Zn release and soil Zn supply capacity during the decomposition[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(5): 1188–1196
[35] 赵娜, 赵护兵, 鱼昌为, 等. 旱地豆科绿肥腐解及养分释放动态研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1179–1187
Zhao N, Zhao H B, Yu C W, et al. Nutrient releases of leguminous green manures in rainfed lands[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(5): 1179–1187
[36] 张红, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 不同植物秸秆腐解特性与土壤微生物功能多样性研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 743–752
Zhang H, Lü J L, Cao Y F, et al. Decomposition characteristics of different plant straws and soil microbial functional diversity[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(4): 743–752
[37] Devêvre O C, Horwáth W R. Decomposition of rice straw and microbial carbon use efficiency under different soil temperatures and moistures[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(11/12): 1773–1785